

HVOF 喷涂 WC-12Co 粒子沉积行为分析

查柏林^{1,2}, 贾旭东¹, 王金山¹, 石易昂¹, 苏庆东¹, 张天昊³

(1.火箭军工程大学, 西安 710038; 2.火箭军装备部装备项目管理中心,
北京 100085; 3.南昌航空大学, 南昌 330038)

摘要: **目的** 研究不同超音速火焰喷涂条件下 WC-12Co 粒子在 45[#]碳钢基体上的沉积变形行为。**方法** 基于 Johnson-Cook 塑性材料模型与 Thermal-Isotropy-Phase-Change 热材料模型, 采用 LS-DYNA 进行建模分析。**结果** 不同喷涂参数下, WC-12Co 粒子在 45[#]碳钢基体上的沉积行为存在明显差异。沉积过程中, 粒子等效塑性应变幅度高于基体; 粒子边缘位置等效塑性应变幅度高于粒子中心轴线位置; 粒子初始速度与初始温度的增加有助于提升结合界面温度与粒子扁平化程度; 粒子初始温度与粒子初始速度对接触界面能量变化影响程度基本一致, 单位粒子初始速度与温度提升的能量贡献比 λ 分别为 0.78 以及 0.76, 二者的能量贡献比近似相同; 适度的基体预热 ($T_s=500\text{ K}$) 可以促进粒子变形, 加深沉积坑深度, 增大粒子与基体的结合面积, 有助于提升粒子与基体之间的结合强度。基体过冷 ($T_s=300\text{ K}$) 将导致粒子“翘曲”, 降低粒子与基体之间的结合面积, 基体过热 ($T_s=600\text{ K}$) 将导致二者结合处于不稳定状态, 易引起粒子剥落, 二者均不利于粒子与基体的有效结合。**结论** 一定范围内提升粒子初始速度、温度与基体初始温度, 可以提高粒子扁平化程度, 增大粒子与基体结合面积, 提升粒子与基体的结合性能, 进一步提高涂层质量。

关键词: 超音速火焰喷涂; 有限元; 粒子沉积; 粒子速度; 粒子温度; 基体预热温度

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0101-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.012

Analysis on Deposition Behaviour of WC-12Co Particles Sprayed by HVOF

ZHA Bai-lin^{1,2}, JIA Xu-dong¹, WANG Jin-jin¹, SHI Yi-ang¹, SU Qing-dong¹, ZHANG Tian-hao³

(1.Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710038, China; 2.Project Management Center of PLA Rocket Force Equipment Department, Beijing 100085, China; 3.Nanchang Hangkong University, Nanchang 330038, China)

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2020-09-12

Received: 2020-06-11; Revised: 2020-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52003296); 陕西省自然科学基金资助项目 (2020JQ-488); 陕西省重点实验室基金 (2019SZS-09); 火箭军工程大学导弹工程学院青年基金 (2019DYQNJJ-004)

Fund: Youth Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52003296); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No. 2020JQ-488); Key Laboratory Fund of Shaanxi (No. 2019SZS-09); Youth Fund of Missile Engineering Institute of Rocket Force University of Engineering (No. 2019DYQNJJ-004)

作者简介: 查柏林 (1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为火箭发动机与材料表面改性研究。邮箱: zhabailin@163.com

Biography: ZHA Bai-lin (1974—), Male, Doctor, Professor, Research focus: rocket engine, surface modification study of materials. E-mail: zhabailin@163.com

通讯作者: 王金山 (1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为火箭发动机与热防护技术研究。邮箱: hdwangjinjin@163.com

Corresponding author: WANG Jin-jin (1989—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: rocket engine and thermal protection technology. E-mail: hdwangjinjin@163.com

引文格式: 查柏林, 贾旭东, 王金山, 等. HVOF 喷涂 WC-12Co 粒子沉积行为分析[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 101-110.

ZHA Bai-lin, JIA Xu-dong, WANG Jin-jin, et al. Analysis on deposition behaviour of WC-12Co particles sprayed by HVOF[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 101-110.

ABSTRACT: The work aims to study the deposition deformation behavior of WC-12Co particles on 45[#] carbon steel substrate under different spraying conditions. Based on Johnson-cook plastic material model and Thermal-Isotropy-Phase-Change model, LS-DYNA was used for modeling and analysis. The deposition behavior of WC-12Co particle on 45[#] carbon steel substrate was obviously different under different spraying parameters. During deposition, the equivalent plastic strain amplitude of particles was higher than that of substrate. The equivalent plastic strain amplitude of particle edge was higher than that of particle central axis. The increase of the initial velocity and temperature of particle was helpful to improve the temperature and flattening degree of the interface of contact region. The influence of initial temperature and velocity of particles on that energy change of contact interface was basically consistent. The energy contribution ratio of the initial velocity and temperature of unit particle to the temperature rise was 0.78 and 0.76 respectively, which was approximately the same. The moderate preheating of substrate could promote the deformation of particles, deepen the depth of deposition crater, increase the bonding area between particle and substrate, and improve the bonding strength between particles and substrate. Super-cooling of the substrate led to the “warping” of particles, reduce the bonding area between particles and substrate, and the overheating of the substrate led to the unstable state of the combination, which was easy to cause particle peeling off and was not conducive to the effective combination of particles and substrate. In a certain range, increasing the initial velocity and temperature of the particles and the initial temperature of the substrate can improve the flattening degree of the particles, increase the bonding area between the particles and the substrate, and enhance the bonding performance between the particles and the substrate, thus further improving the coating quality.

KEY WORDS: high velocity oxygen fuel; finite element; particle deposition; particle velocity; particle temperature; substrate preheating temperature

超音速火焰喷涂作为零部件表面改性强化的工艺方法之一,以其环境友好性以及技术先进性,广泛用于设计以及改善材料表面,提高装备零部件性能^[1]。相比于等离子喷涂以及冷喷涂技术,超音速火焰喷涂具有速度高且温度适中的特点,常应用于高密度、高结合强度和低脱碳涂层的生产制备^[2]。实验结果表明^[1],涂层沉积过程实质是喷涂粒子扁平化堆积成形的过程。因此,研究喷涂粒子的沉积行为对于提高涂层质量具有重要意义。

针对喷涂粒子的沉积变形行为, S. Kamni 等^[3-4]采用有限元仿真与实验观察对比的方式,对等离子喷涂过程中液态粒子的扩散、破碎、凝固环节进行研究,发现基体表面粗糙度与粒子的铺展、凝固和空气包封密切相关,光滑的基体表面将促进液态粒子的扩散、破碎以及凝固。D. L. Gilmore 等^[5]针对冷喷涂过程中喷涂粒子在基体上的沉积行为展开数值仿真研究与实验,揭示了粒子速度与沉积效率之间的关系,得出喷涂粒子速度只有高于临界沉积速度才能与基体结合,粒子动能是控制结合界面强度的主要控制因素的结论。R. C. Dykhuiz 等^[6]采用实验观察与数值模拟相结合的手段,研究了冷喷涂工艺下,单个铜粒子在不锈钢基体上的沉积变形行为,研究发现,铜粒子沉积在不锈钢基体上时,基体会产生明显的“沉积坑”,沉积坑的深度以及铜粒子的扁平率与粒子的初始速度成正比,沉积坑的宽度与粒子的直径成正比,实验观察与数值模拟结果呈现出良好的一致性。Wen Sun^[7]等将粒子/基体组合分为软/硬与硬/软两种形式进行数值模拟,结合实验结果探讨了冷喷涂工艺下粒

子在基体上的沉积变形行为以及粒子沉积效率。结果表明,软/硬组合中,粒子沉积效率主要受粒子的沉积变形与粘结控制,而硬/软组合粒子沉积效率主要受基体对粒子的捕获以及机械连锁作用的影响。

综上所述,目前针对等离子喷涂以及冷喷涂粒子沉积行为数值模拟的研究相对较多,影响冷喷涂以及等离子喷涂粒子沉积行为的主要参数分别为粒子速度以及粒子温度,但是针对超音速火焰喷涂,此类热固耦合工况下的粒子沉积行为却鲜有报道。通常情况下, HVOF 喷涂的沉积效率在 50%左右^[8]。因此,考虑粒子与基体的动能和热能之间复杂的相互作用,研究超音速火焰喷涂工艺下粒子的沉积变形行为,对于改进涂层结构,提升涂层沉积效率具有重要意义。

1 仿真模型

1.1 有限元撞击模型

传统超音速火焰喷涂粒子的撞击速度通常可达 400~800 m/s,粒子温度可达 800~1500 K^[9]。粒子与基体撞击过程具有明显的非线性特征,接触区域将产生剧烈的塑性形变,发生物理结合甚至冶金结合。因此,本文在非线性的动力冲击背景下,使用 LS-DYNA 软件对 WC-12Co 粒子在 45[#]碳钢基体上的粒子沉积行为进行了建模分析,计算结果综合考虑了粒子沉积过程中应变强化、升温熔化、摩擦以及塑性功与热能之间的转化。

图 1 为超音速火焰喷涂实验使用的具有良好耐

磨性^[10]的 Metco-WOKA-3102 型 WC-12Co 喷涂粉末微观结构图,其形状近似为球形,具有良好的流动性,粉末粒径分布范围为 15~45 μm 。

根据粒子与基体的几何与物理参数建立三维粒子-基体撞击模型。图 2 所示的计算模型中,WC-12Co 粒子直径取粉末粒径分布的平均值 30 μm ,45#碳钢基体的长度、宽度、高度均为粒子直径的 4 倍,考虑到碰撞的对称性,建立轴对称模型,以减少计算量。同时,由于基体尺寸较大,可以忽略粒子撞击过程中基体边界节点对基体中心变形区域的影响^[11]。

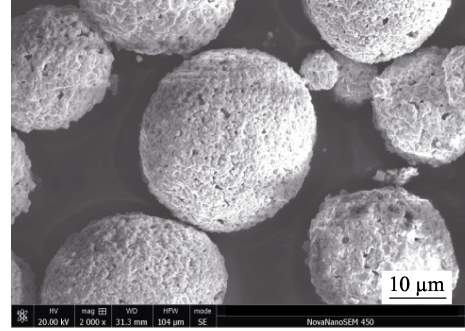


图 1 喷涂粒子形貌图

Fig.1 Morphology of sprayed particles

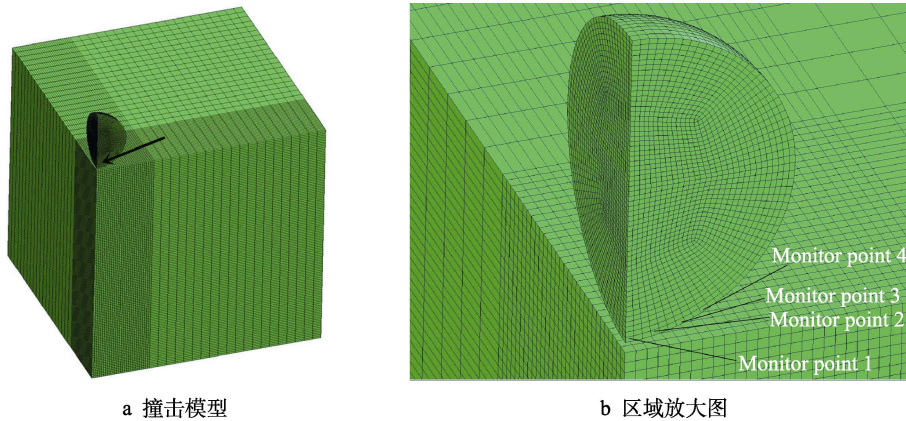


图 2 三维有限元撞击模型

Fig.2 Three dimensional finite element impact model: a) impact model; b) enlarged view of black arrow area

计算过程中,粒子与基体的结合时间十分短暂,以 ns 为计量单位,粒子与基体之间的热传导距离远小于二者的特征单元尺寸^[12]。因此,可以忽略粒子与基体之间的传热,即认为粒子与基体之间绝热^[13-14]。

该假设可以通过无量纲参数 $\left(\frac{x^2}{D \times t}\right)$ 进行表征,以证明其有效性。

各参数意义如下: x 指系统单元特征尺寸,此处为 3×10^{-5} m; D 为材料的热扩散系数,此处为 $2 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ m²/s; t 为粒子沉积过程所需时间,此处小于 100 ns。

当 $\left(\frac{x^2}{D \times t}\right) > 1$ 时,为绝热过程。保守计算,该无量纲参数值为 600,远大于 1,因此假设粒子沉积过程为绝热过程。

考虑到网格尺寸对材料的热传导以及塑性变形会产生显著影响^[15-16],对于需要精确计算的区域进行网格细化,对于边缘计算区域进行网格粗化,可确保计算精度并减少计算成本。本模型网格划分过程中,粒子与基体直接接触区域的网格尺寸为 0.5 μm ,边缘区域网格尺寸为 1.0 μm 。

针对图 2 所示的三维有限元模型,对基体的底面施加全约束,对 WC-12Co 粒子与 45#碳钢基体的对称面施加面对称约束,对基体侧面施加无反射边界条件,其余表面均设置为自由状态。粒子与基体的接触

算法采用 AUTO-Surface to Surface 法,在不探究基体预热温度对粒子沉积行为的影响过程中,基体预热温度均设置为常温 298 K。

1.2 材料模型

WC-12Co 粒子与 45#碳钢基体的弹性响应采用线弹性模型,塑性响应采用 Johnson-Cook 塑性模型,该模型考虑了粒子沉积过程中的应变强化、升温熔化、摩擦以及塑性功与热能之间的转化。粒子与基体的热材料模型选取 Thermal-Isotropy-Phase-Change 热材料模型,为减少计算误差,计算所用数据均来自实验测量。Johnson-Cook 塑性模型具体表达式^[16]如下:

$$\tau = [A + B(\varepsilon_p)^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (2)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3)$$

式中: τ 表示材料屈服应力, ε_p 表示材料等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}_p$ 表示材料等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 表示材料参考等效塑性应变率, T 表示材料温度, T_r 表示材料参考温度, T_m 表示材料熔化温度(固液相分界线), A 表示静态屈服强度, B 表示应变强化模量, C 表示应变率强化模量, m 表示温度软化指数, n 表示应变

强化指数。表达式(1)中第一项 $[A+B(\varepsilon_p)^n]$ 表示等温状态下材料应力与应变之间的函数关系,第二项 $(1+C\ln \dot{\varepsilon}^*)$ 与第三项 $[1-(T^*)^m]$ 分别表示材料应变率以及材料温度对材料屈服应力的影响。WC-12Co 粒子与 45#碳钢基体的材料属性如表 1 所示。

表 1 粒子与基体参数^[1,8]
Tab.1 Particle and substrate parameters^[1,8]

Material parameters	WC-12Co	45# carbon steel
Density/(g·cm ⁻³)	14.44	7.83
Young's modulus/GPa	650	210
Shear modulus/GPa	256	83.33
Poisson's ratio	0.27	0.26
Static yield strength/GPa	1.55	0.507
Strain hardening modulus/GPa	2.2	0.32
Strain rate hardening modulus	0.031	0.28
Thermal softening index	1.34	1.06
Strain rate hardening index	0.45	0.064
Reference temperature/K	298	298
Melting temperature/K	1680	1495
Heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	292	460

2 结果与讨论

2.1 喷涂粒子沉积动态变形行为

粒子沉积实质为粒子动能向粒子内能以及基体内能的转化过程,因假设粒子与基体之间绝热,故粒子及基体的温升均由塑性功转化而来^[17]。沉积过程中,能量转变具体表达式如下:

$$E_{kp} = U_{kp} + U_{ks} = U_p + U_s + T_p + T_s \quad (4)$$

式中, E_{kp} 为粒子初始动能, U_{kp} 为粒子内能, U_{ks} 为基体内能, U_p 为粒子弹性势能, U_s 为基体弹性势能, T_p 为粒子温升, T_s 为基体温升。

图 3 为初始速度 800 m/s、初始温度 800 K 的球形粒子在沉积过程中不同时刻的等效塑性应变云图。粒子在撞击基体后立即开始变形,在基底上形成沉积坑。15 ns 时,接触面变形明显,沉积坑的宽度和深度同时增加以配合粒子的变形。20 ns 时,粒子的边缘开始发生翘曲,并逐渐形成射流,沿径向扩散,随后在粒子射流的影响下,沉积坑边缘也逐渐翘曲,并形成基体射流。45 ns 时,粒子动能逐渐下降为零,粒子呈透镜状且边缘翘曲,观察粒子沉积变形全过程,发现基体的塑性应变幅度远低于粒子的塑性应变幅度。

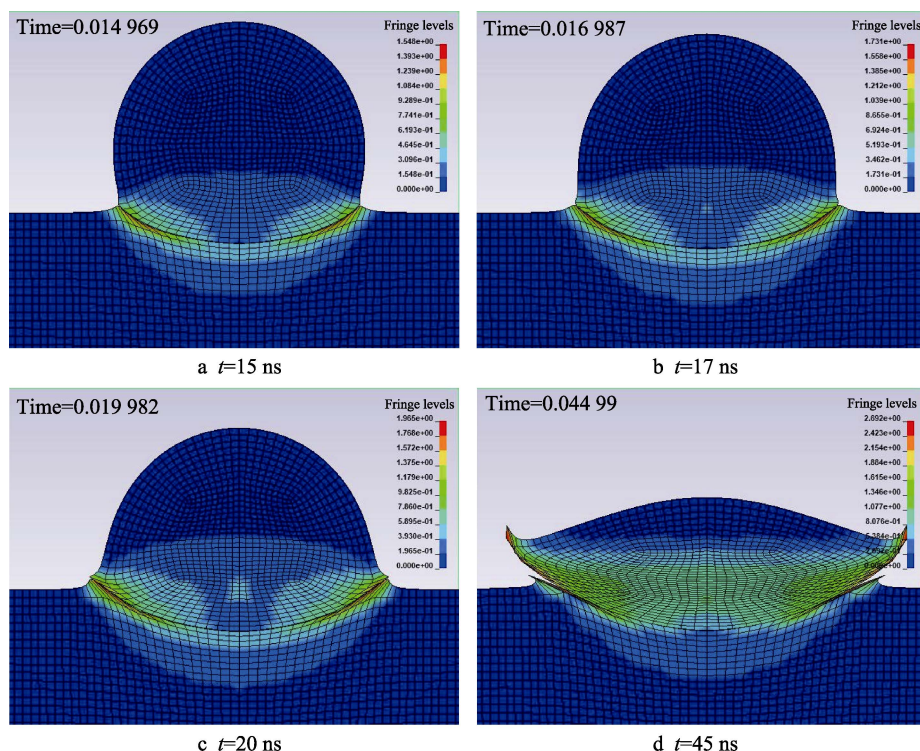


图 3 粒子沉积过程等效塑性应变云图

Fig.3 Equivalent plastic strain distribution of particle deposition process

图 4 为初始速度 800 m/s、初始温度 800 K 的球形粒子在沉积过程中的温度分布云图,粒子与基体的最高温度均位于二者边缘的“薄壁区域”,此时粒子的最高温度达到熔点,处于半熔化状态。在此区域内,

粒子由塑性变形向黏性变形转变,此时粒子与基体之间的结合方式易由机械结合转变为冶金结合,粒子与基体的结合将更加牢固。

图 5 为监测点的等效塑性应变曲线以及温度变

化曲线。根据等效塑性应变曲线(图 5a), 粒子与基体接触后, 粒子底部(监测点 1)首先发生塑性应变, 随后向上推移。4 个监测点中, 监测点 1 处(粒子中心轴线位置)等效塑性应变幅度最小, 为 0.56, 监测

点 4(粒子边缘位置)等效塑性应变幅度最大, 为 2.69, 粒子边缘位置处的等效塑性应变幅度大于粒子中心轴线处。与之相对应, 监测点温度曲线变化趋势与等效塑性应变曲线变化趋势相同, 如图 5b 所示。

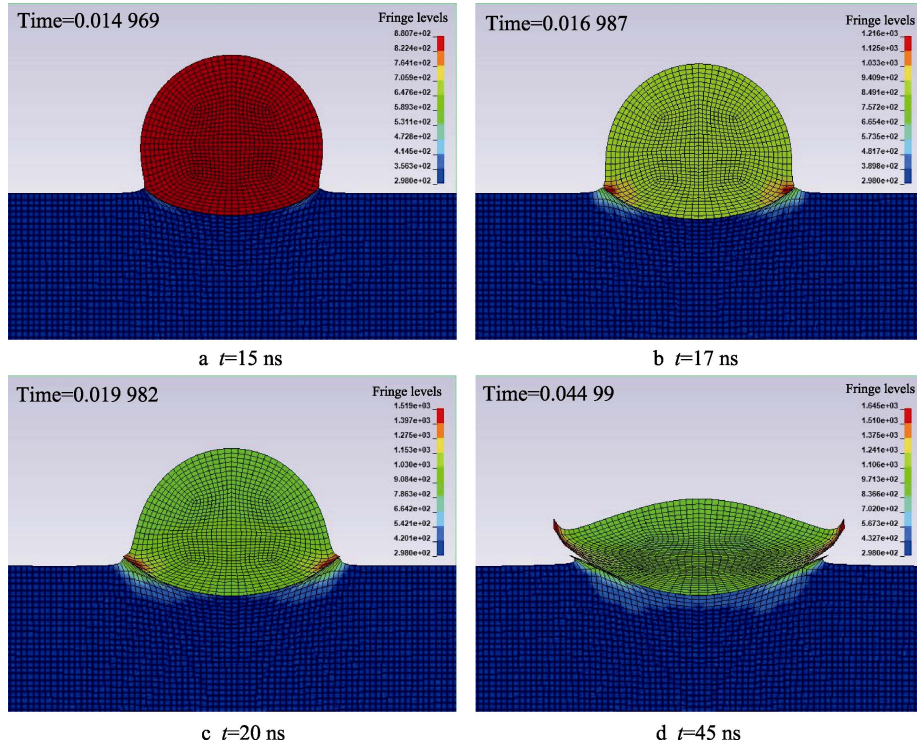


图 4 粒子沉积过程温度云图

Fig.4 Temperature distribution of particle deposition process

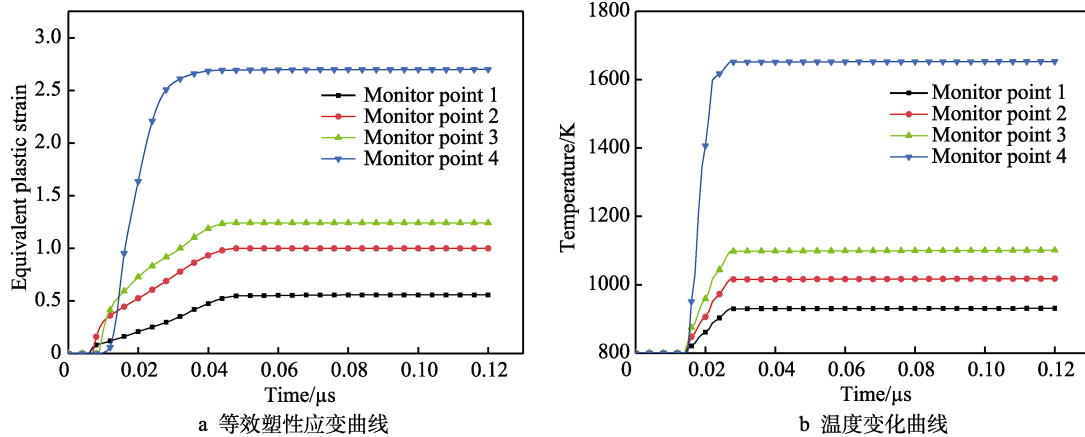


图 5 监测点等效塑性应变及温度变化曲线

Fig.5 Curve of equivalent plastic strain and temperature at monitor point: a) curve of equivalent plastic strain; b) curve of temperature

因此, 粒子变形沉积过程中, 粒子等效塑性应变幅度高于基体, 粒子边缘位置的等效塑性应变幅度大于粒子中心位置, 粒子温升源于塑性功转换, 故粒子边缘位置处的温升幅度高于粒子中心处的温升幅度。

2.2 初始速度对粒子沉积行为的影响

前文描述了粒子沉积行为状态的总体变化趋势, 本节将探讨初始速度对粒子沉积行为的影响。粒子速

度 V_p 分别为 300、550、800 m/s, 粒子初始温度 T_p 保持为 800 K^[18], 监测点 4 处的温升以及屈服应力为粒子的最大值, 所以选取监测点 4(粒子边缘位置)监控粒子的动态变化行为。

图 6 为监测点 4 的温度变化曲线。观察温度变化曲线可知, 随着粒子速度的增加, 粒子的最大温升幅度逐渐增大, 3 种速度下对应最大温升幅度分别为 922、1170、1645 K, 同时, 粒子温升时间提前, 粒

子温升速率上升。因此,增加粒子初始速度将增加粒子温升幅度以及温升速率,提前温升时间。

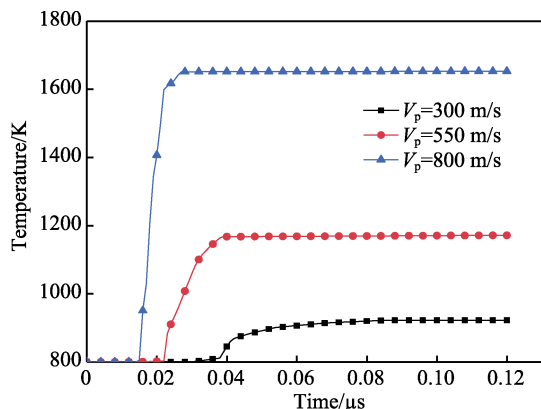


图6 不同初始速度下监测点温度变化曲线

Fig.6 Temperature curve of monitoring point under different initial velocity

图7为监测点4屈服应力变化曲线。伴随冲击速度的增加,监测点屈服应力峰值分别为2.87、3.64、3.95 GPa,粒子速度 $V_p=800$ m/s时,屈服应力变化的特点为不稳定性下降以及变化幅度接近于零。原因是在粒子变形过程中,粒子屈服应力受应变强化与热软化效应影响,根据监测点温升曲线可得,冲击速度小于800 m/s时,粒子温度远低于熔点,应变强化效应的影响高于热软化效应;当冲击速度等于800 m/s时,粒子温度接近熔点,粒子变形机制由塑性变形向黏性变形转变,热软化效应的影响高于应变强化效应,颗粒在基底上的结合更加有效。

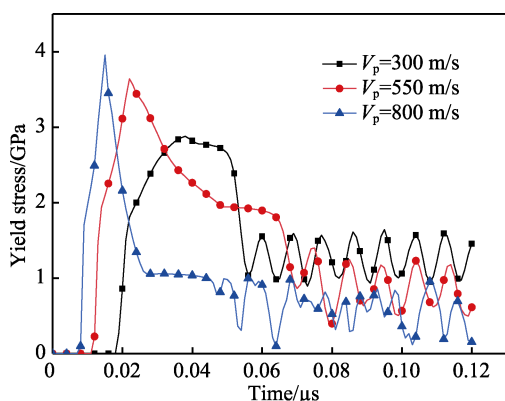


图7 不同初始速度下监测点屈服应力曲线

Fig.7 Yield stress curve of monitoring point under different initial velocity

因此,粒子初始速度增加将导致屈服应力峰值增加,伴随粒子达到熔点,粒子变形机制由塑性变形向黏性变形转变,屈服应力变化的不稳定性下降,最小值更接近于0,粒子与基体结合将更加有效。

定义粒子扁平率为:

$$\eta = \frac{D_c - D_z}{D_c} \quad (5)$$

式中: D_c 为粒子初始高度,即粒子直径, D_z 为粒子变形后高度。

定义粒子沉积坑深度为:

$$H = H_0 - H_M \quad (6)$$

式中: H 为基体沉积坑深度,以基体底面为基准面, H_0 为基体表面高度, H_M 为沉积坑最深处高度。

图8为不同初始速度下粒子扁平率与沉积坑深度折线图。粒子速度 $V_p=300$ m/s时,粒子扁平率与沉积坑深度分别为0.20与2.35 μm ,粒子速度 $V_p=800$ m/s时,粒子扁平率与沉积坑深度分别为0.49与6.12 μm 。伴随初始速度增加,粒子扁平率与沉积坑深度均逐渐增加。原因在于粒子初始速度的增加将对基体造成更大的冲击,增大基体塑性变形程度,提升基体温度,促进基体软化,进一步增大沉积坑深度。因此,提升粒子初始速度将加深沉积坑深度,促进粒子的扁平化变形,增大粒子与基体的结合面积。

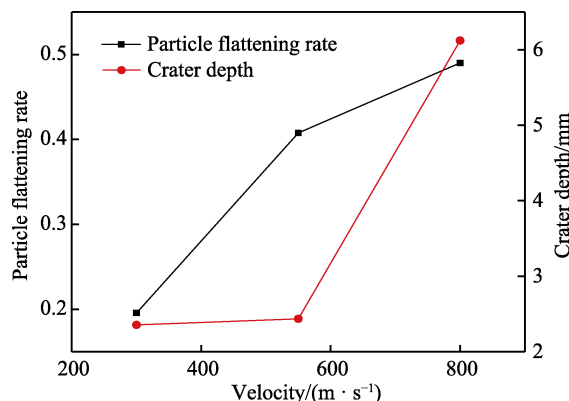


图8 不同初始速度下粒子扁平率及沉积坑深度折线图

Fig.8 Distribution of particle flattening rate/crater depth under different initial velocity

2.3 初始温度对粒子沉积行为的影响

不同于冷喷涂以及等离子喷涂,在HVOF过程中,粒子从Laval喷管尾部径向注入到燃气射流内,与燃气射流完成动量以及热量的交换。因此,粒子具有较高的动能以及热能,二者都会对粒子的沉积行为产生一定程度的影响,但是二者对于粒子与基体成功结合的影响程度尚不明确。仿真模型固定粒子的初始速度 $V_p=550$ m/s,改变粒子的初始温度 T_p ,在800、900、1000 K的情况下观察粒子沉积变形行为,监测点4处的温升以及屈服应力为粒子最大值,遂选取监测点4(粒子边缘位置)的参数变化表征粒子-基体接触界面的动态变化行为。

图9为粒子在不同初始温度下监测点4的温度变化曲线。监测点的温度峰值与粒子初始温度 T_p 正相关,粒子初始温度 T_p 从800 K增加为1000 K,监测点的温度增加了132 K;粒子初始速度 V_p 从300 m/s提升为800 m/s,监测点的温度增加731 K。定义能量

转换率 λ 为初始速度提升或初始温度提升引起监测点最终能量变化率, 其表达式如下:

$$\lambda = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{c_p m \Delta T}{c_p m \Delta t} = \frac{c_p m \Delta T}{\frac{1}{2} m \Delta v^2} \quad (7)$$

$$Q_1 = c_p m \Delta T \quad (8)$$

$$Q_2 = c_p m \Delta t = \frac{1}{2} m \Delta v^2 \quad (9)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (10)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (11)$$

式中: Q_1 为监测点温度改变引起的能量变化量, Q_2 为粒子初始温度或速度变化引起的能量变化量, c_p 为粒子比热容, m 为粒子监测点质量, ΔT 为监测点温度改变量, Δt 为粒子初始温度改变量, Δv^2 为粒子初始速度平方改变量。

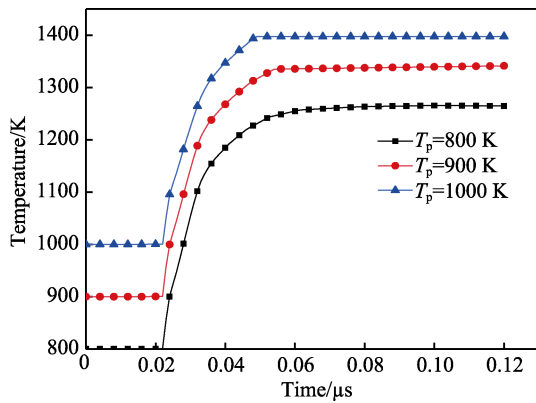


图 9 不同初始温度下监测点温度曲线

Fig.9 Temperature curve of monitoring point under different initial temperature

单位粒子速度与单位粒子温度提升的能量贡献比 λ 分别为 0.78 以及 0.76, 二者的能量贡献比基本一致, 说明二者对监测点能量变化的影响程度基本一致。原因在于粒子初始速度的提升将为粒子带来更多的能量, 以产生塑性变形并转化为温升, 粒子初始温度的增加对粒子产生软化效应, 以促进粒子塑性变形。

图 10 为粒子在不同初始温度下监测点 4 的屈服应力变化曲线, 伴随粒子初始温度增加, 三种状态下屈服应力峰值分别为 3.07、3.03、2.75 GPa, 粒子的屈服应力峰值呈现下降趋势, 且屈服应力的变化规律更加稳定。原因在于粒子初始温度的增加将增强粒子的温度软化效应, 同时伴随粒子温度接近熔点, 粒子的变形机制由塑性变形向黏性变形发生转变。

图 11 为不同初始温度下粒子扁平率及沉积坑深度的折线图, 粒子初始温度 $T_p = 800$ K 时, 粒子扁平率与沉积坑深度分别为 0.49 与 6.38 μm , 粒子初始温度 $T_p = 1000$ K 时, 粒子扁平率与沉积坑深度分别为 0.57 与 6.23 μm , 伴随粒子初始温度 T_p 的增加, 粒子扁平率逐渐增加, 基体沉积坑深度逐渐下降。原因在

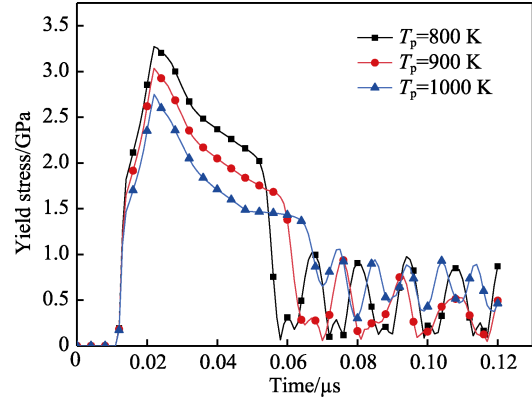


图 10 不同初始温度下监测点屈服应力曲线

Fig.10 Yield stress curve of monitoring point under different initial temperature

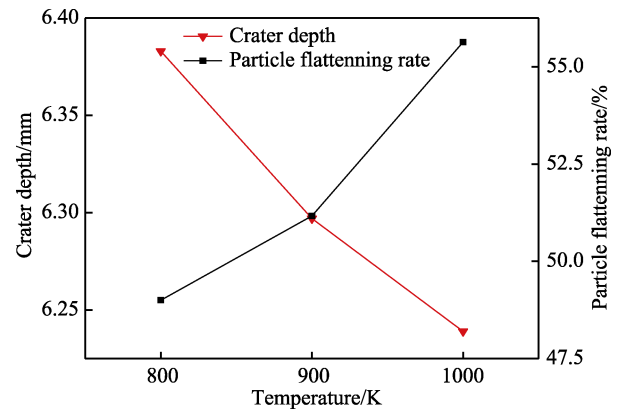


图 11 不同初始温度下粒子扁平率及沉积坑深度折线图

Fig.11 Distribution of particle flattening rate/crater depth under different initial temperature

于粒子温度提升将促进粒子软化变形, 粒子塑性变形将消耗更多的动能, 降低基体的塑性变形。

因此, 粒子初始温度的增加将降低屈服应力峰值, 并使屈服应力变化更加规律, 同时促进粒子扁平化变形, 增大粒子与基体的结合面积, 但会小范围降低基体沉积坑深度。粒子动能与粒子热能对接触界面能量变化影响程度基本一致。

2.4 基体预热温度对粒子沉积行为的影响

粒子在基体上的沉积, 实质上是粒子与基体发生塑性甚至黏性变形, 从而在二者接触区域的薄壁产生机械结合甚至冶金结合的过程^[19-21]。二者在碰撞前的状态都将影响粒子的沉积行为。前述从喷涂粒子角度探讨了粒子沉积过程, 本节重点考虑基体预热温度对于沉积过程的影响。研究过程设定粒子初始速度 V_p 、温度 T_p 分别为 800 m/s、800 K, 基体初始温度 T_s 分别为 298、400、500、600 K, 代表基体无预热以及三种预热工况。

图 12 为不同预热温度下粒子与基体的等效塑性应变云图, $T_s = 298$ K 时, 粒子边缘发生明显“翘曲”, 等效塑性变形最大处均位于“翘曲”部分, 同时沉积坑

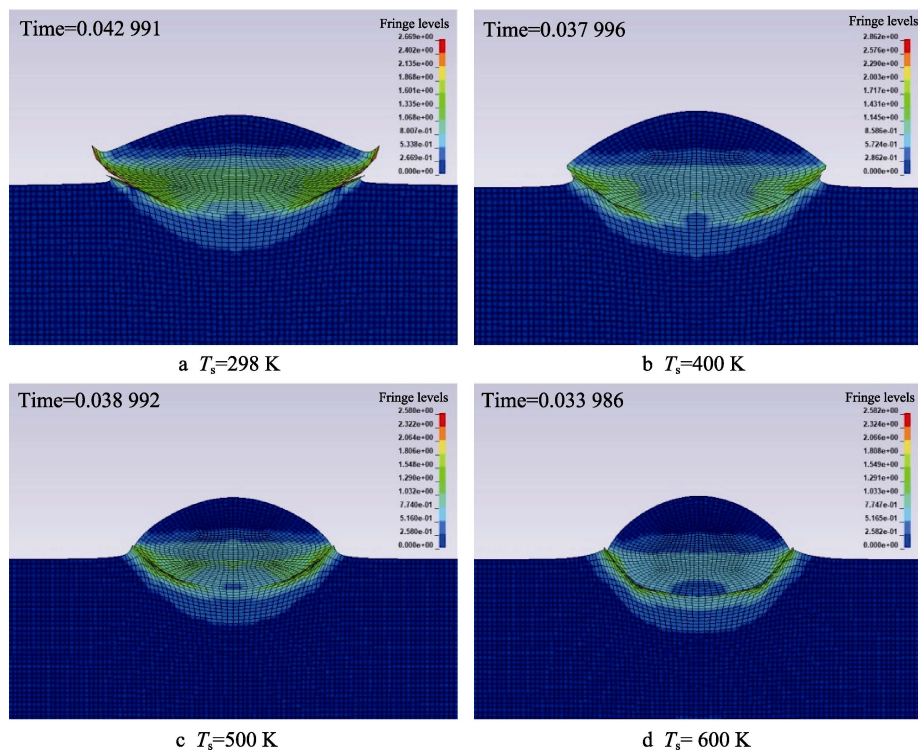


图 12 不同预热温度下粒子及基体等效塑性应变云图

Fig.12 Distribution of equivalent plastic strain of particle/substrate at different initial temperature

深度较浅,粒子与基体结合的必要条件为二者均产生适度变形以相互配合,因此基体在非预热状态下,粒子沉积效果并不理想。结合图 13 不同基体初始温度下粒子等效塑性应变与温度变化折线图可知,伴随基体初始温度上升,粒子的等效塑性应变幅度与粒子温度均出现“降—升—降”的变化趋势。 $T_s=500\text{ K}$ 时,粒子等效塑性应变幅度以及温升幅度为基体预热情况下最高,分别为 1.776 与 1342 K。 $T_s=600\text{ K}$ 时,粒子等效塑性应变幅度以及温升幅度低于 $T_s=500\text{ K}$ 。

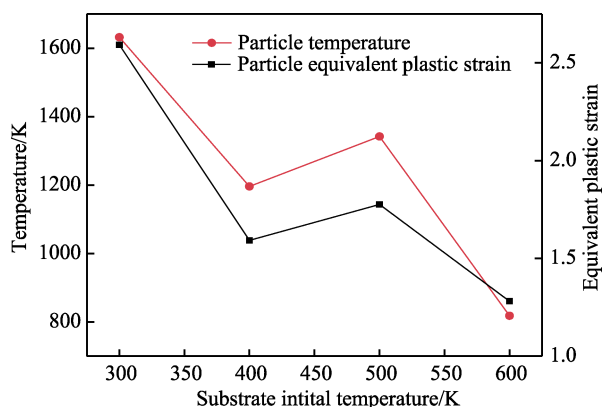
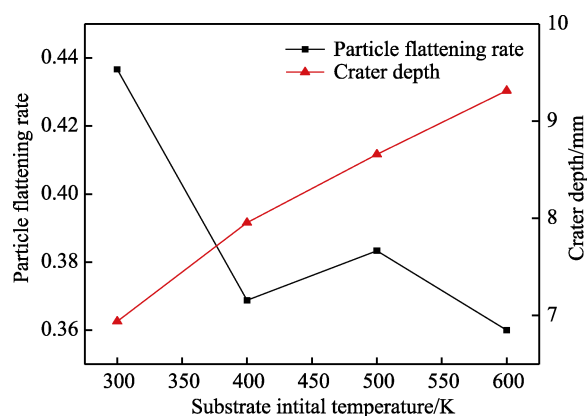
图 13 不同预热温度下粒子温度与等效塑性应变折线图
Fig.13 Distribution of particle temperature and equivalent plastic strain at different preheating temperature

图 14 为粒子扁平率及沉积坑深度折线图,伴随基体预热温度增加,粒子扁平率与等效塑性应变幅度变化趋势相同, $T_s=500\text{ K}$ 时,粒子的扁平率最大为

0.38。沉积坑的深度伴随基体初始温度的增加而增加, $T_s=300\text{ K}$ 时,沉积坑深度为 $6.94\text{ }\mu\text{m}$, $T_s=500\text{ K}$ 时,沉积坑深度增加至 $9.31\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,一定程度的基体预热有助于加深沉积坑深度,增大粒子扁平率,增大粒子与基体的结合面积。

图 14 不同预热温度下粒子扁平率及沉积坑深度折线图
Fig.14 Distribution of particle flattening rate/crater depth under different preheating temperature

但是,根据式(4),在忽略粒子动能随弹性波传递产生耗散的情况下^[22-24],粒子的动能全部转化为粒子与基体的弹性变形做功以及塑性变形做功,弹性变形做功以内能形式在材料内部存储,塑性变形做功以热(温升)的形式耗散^[25-26]。

图 15 为不同预热温度下粒子及基体内能变化曲线。伴随时间推移,粒子动能耗散殆尽。结合稳定状

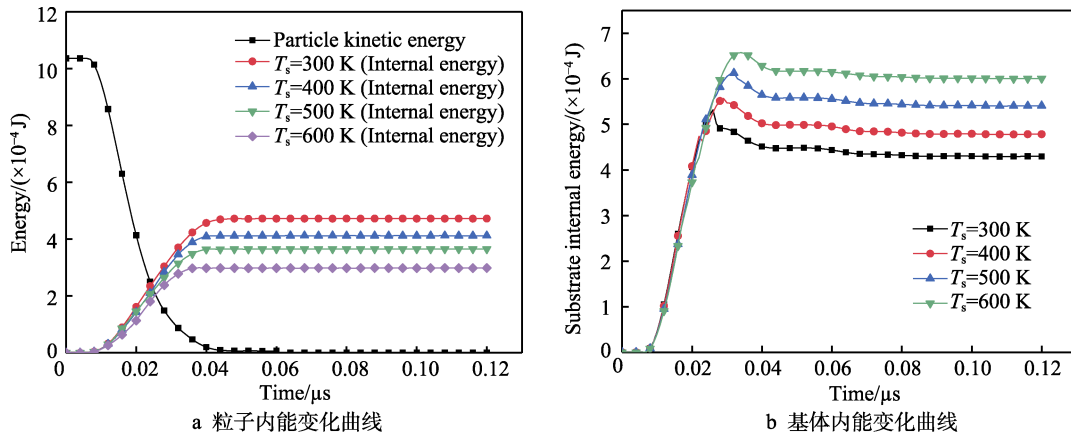


图 15 不同预热温度下粒子及基体内能变化曲线

Fig.15 Internal energy curve of particles and substrate at different preheating temperature

态下, T_s 为 300、400、500、600 K 时, 对应粒子内能分别为 4.72×10^{-4} 、 4.11×10^{-4} 、 3.65×10^{-4} 、 2.98×10^{-4} J; 相应基体内能分别为 4.29×10^{-4} 、 4.77×10^{-4} 、 5.40×10^{-4} 、 6.01×10^{-4} J。粒子内能与等效塑性应变幅度下降, 表明粒子变形程度下降, 进而导致粒子与基体结合面积下降。基体内能过剩将引起基体内弹性形变增加^[22], 导致二者结合处于不稳定状态, 易产生粒子的反弹剥落。上述结果表明, 过度的基体预热将会降低粒子与基体的结合强度, 影响涂层质量, 就仿真结果而言, 最佳的预热温度 $T_s = 500$ K。

因此, 基体过冷将导致粒子“翘曲”, 减小粒子与基体之间的结合面积, 基体过热将导致二者结合处于不稳定状态, 引起粒子剥落, 二者均不利于粒子与基体的有效结合。适度的基体预热可以促进粒子变形, 并增大粒子与基体的结合面积, 有助于提升粒子与基体之间的结合强度。

3 结论

本文采用 Johnson-Cook 塑性材料模型与 Thermal Isotropy-Phase-change 热材料模型开展了 WC-12Co 粒子在 45# 碳钢基体上的粒子沉积行为建模分析, 对比分析了不同喷涂参数下粒子在基体上的沉积行为, 得到以下结论:

1) 粒子变形沉积过程中, 粒子等效塑性应变幅度高于基体, 粒子边缘位置的等效塑性应变幅度大于粒子中心位置, 粒子温升源于塑性功转换, 从而粒子边缘位置处的温升幅度高于粒子中心处的温升幅度。

2) 粒子速度提升将增强粒子的等效塑性应变, 进一步增大粒子温升。粒子速度由 300 m/s 增加至 800 m/s 时, 屈服应力峰值由 2.87 GPa 增加至 3.95 GPa, 粒子温度达到熔点 (1640 K), 变形机制由塑性变形向黏性变形转变, 屈服应力不稳定性下降, 最小值更接近于 0, 粒子与基体结合将更加有效。

3) 粒子碰撞前的动能以及热能对于粒子-基体接

触区域的能量贡献程度一致, 单位粒子速度与单位粒子温度提升的能量贡献比 λ 分别为 0.78 以及 0.76。粒子初始速度的提升将为粒子带来更多的能量, 以产生塑性变形并转化为温升; 粒子初始温度的增加对粒子产生软化效应, 以促进粒子塑性变形。

4) 基体过冷将导致粒子“翘曲”, 基体过热将导致粒子与基体结合处于不稳定状态, 二者均不利于粒子与基体的有效结合, 会引起粒子剥落。基体预热状态下, $T_s = 500$ K 时, 粒子等效塑性应变幅度以及温升幅度为基体预热情况下最高, 分别为 1.776 与 1342 K, 且沉积坑深度适中, 为 9.31 μm , 二者均产生适度变形相互配合以充分结合, 增大粒子与基体的结合面积, 有助于提升粒子与基体之间的结合强度。

参考文献:

- [1] 查柏林, 王汉功, 袁晓静. 超音速火焰喷涂技术与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
ZHA Bai-lin, WANG Han-gong, YUAN Xiao-jing. High velocity oxy-fuel spraying technology and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [2] GU S, KAMNIS S. Bonding mechanism from the impact of thermally sprayed solid particles [J]. Metallurgical and materials transactions, 2009, 40(11): 2664-2674.
- [3] KAMNIS S, GU S. Numerical modelling of droplet impingement [J]. Journal of physics: Applied physics, 2005, 38(19): 3664-3673.
- [4] KAMNIS S, GU S, LU T J. Numerical modelling of sequential droplet impingements [J]. Journal of physics: Applied physics, 2008, 41(16): 165303-164307.
- [5] GILMORE D L, DYKHUIZEN R C, NEISER R A, et al. Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process [J]. Journal of thermal spray technology, 1999, 8(4): 576-582.

- [6] DYKHUIZEN R C, SMITH M F, GILMORE D L, et al. Impact of high velocity cold spray particles[J]. *Journal of thermal spray technology*, 1999, 8(4): 559-564.
- [7] SUN W, TAN A W Y, BHOWMIK A, et al. Deposition characteristics of cold sprayed inconel 718 particles on inconel 718 substrates with different surface conditions[J]. *Materials science and engineering*, 2018, 720: 75-84.
- [8] JOSHI S V, SIVAKUMAR R. Particle behaviour during high velocity oxy-fuel spraying[J]. *Surface and coatings technology*, 1991, 50(1): 67-74.
- [9] 叶福兴, 牛安宁, 郭磊. HVOF 喷涂 WC-17Co 粉末的粒子撞击行为研究[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2016, 49(8): 882-887.
YE Fu-xing, NIU An-ning, GUO Lei. Impact behavior of WC-17Co particle in HVOF spraying[J]. *Journal of Tianjin University: Natural science and engineering technology*, 2016, 49(8): 882-887.
- [10] 查柏林, 乔素磊, 黄定园. 粉末粒度对 HVOF 制备 WC-12Co 涂层性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2014(4): 138-140.
ZHA Bai-lin, QIAO Su-lei, HUANG Ding-yuan. Effect of powder granularity on properties of WC-12Co coating sprayed by HVOF[J]. *Hot working technology*, 2014(4): 138-140.
- [11] ASSADI H, GERTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. *Acta materialia*, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [12] MENG F, HU D, GAO Y, et al. Cold-spray bonding mechanisms and deposition efficiency prediction for particle/substrate with distinct deformability[J]. *Materials and design*, 2016, 109: 503-510.
- [13] OZDEMIR O C, WIDENER C A, HELFRITCH D, et al. Estimating the effect of helium and nitrogen mixing on deposition efficiency in cold spray[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2016, 25(4): 660-671.
- [14] GRUJICIC M, SAYLOR J R, BEASLEY D E. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process[J]. *Applied surface science*, 2003, 219(3): 211-227.
- [15] TZOU D Y. A unified field approach for heat conduction from macro to micro-scales[J]. *Journal of heat transfer*, 1995, 117(1): 8-16.
- [16] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[J]. *Engineering fracture mechanics*, 1983, 21: 541-548.
- [17] 李浩. 热力学第二定律在金属结构弹塑性变形中的应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
LI Hao. The application of the second law of thermodynamics in the elastic-plastic deformation of metal structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [18] 查柏林, 江鹏, 袁晓静. 多功能超音速火焰喷涂粒子速度的计算机仿真[J]. *材料保护*, 2011, 44(6): 5-7.
ZHA Bai-lin, JIANG Peng, YUAN Xiao-jing. Computer simulation of particle velocity in HVOF[J]. *Materials protection*, 2011, 44(6): 5-7.
- [19] RAJEEV K, SIA N. Determination of temperature rise during high strain rate deformation[J]. *Mechanics of materials*, 1998, 27(1): 1-12.
- [20] GRUJICIC M, ZHAO C L, DEROSSET W S, et al. Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold gas dynamic spray process[J]. *Materials and design*, 2004, 25(8): 681-688.
- [21] BAE G, XIONG Y, KUMAR S, et al. General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings[J]. *Acta materialia*, 2008, 56(17): 4858-4868.
- [22] HUTCHINGS I. Energy absorbed by elastic waves during plastic impact[J]. *Journal of physics: Applied physics*, 1979, 12(11): 1819-1824.
- [23] KLINKOV S V, KOSAREV V F, REIN M. Cold spray deposition: Significance of particle impact phenomena[J]. *Aerospace science and technology*, 2005, 9(7): 582-591.
- [24] ZHANG D, SHIPWAY P H, MCCARTNEY D G. Cold gas dynamic spraying of aluminum: The role of substrate characteristics in deposit formation[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2005, 14(1): 109-116.
- [25] SAMSON T, MACDONALD D, FERNÁNDEZ R, et al. Effect of pulsed waterjet surface preparation on the adhesion strength of cold gas dynamic sprayed aluminum coatings[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2015, 24(6): 984-993.
- [26] KING P C, BAE G, ZAHIRI S H, et al. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2010, 19(3): 620-634.